

双重介质油藏中垂直裂缝井流量 动态预测方法的研究

刘曰武*

刘慈群

TE 33/
TE 357.1

(中国科学院力学研究所, 北京 100080) (中国科学院渗流流体力学研究所, 廊坊 065007)

摘要 给出了双重介质油藏中无限导流和有限导流垂直裂缝井的单井流量动态预测模型的解。为了对该解的正确性进行论证, 对所得解作了简化, 并将简化为均质解的情况与国内外已有的有关的解作了对比, 通过对比, 可以更加清楚地看到该模型优于其它模型。还给出了一口井例的流量分析和该井的压裂设计产量预测, 由此说明了该模型的使用。并提出了两种适合于不同预测目的流量动态的预测方法。

关键词 双重介质 油藏 水力压裂 垂直裂缝井 模型 产量预测 典型曲线

引言

在压裂井的试井分析研究中, 人们着重于压力分析的研究, 对单井产量预测的研究进行的比较少。A.C. Gringarten^[1]对均质油藏的垂直裂缝井压力动态作了解析分析; F. Kucuk^[2]等得到了对均质油藏无限导流垂直裂缝井的压力和产量的精确解; R.G. Agarwal^[3]等对均匀介质气藏中的垂直裂缝井的产量进行了数值差分评价; H. Cincoley^[4]对均质油藏中有限导流垂直裂缝井的压力动态进行了数值解析分析; Li Y.C.^[5]等对均质油藏中有限导流垂直裂缝井的流量进行了有限元数值分析; 刘慈群^[6,7]等根据影响椭圆的概念和平均值方法, 找到了双重介质无限导流和有限导流的垂直裂缝井的压力流量的近似解析解。

本文在此基础上作出了双重介质油藏的垂直裂缝井的流量动态预测模型, 并进行了大量的论证对比, 证明了该模型的正确性。通过对实际井例的分析说明了该模型的使用方法。并提出两种适合于预测目的的流量动态的预测方法。

物理模型描述

在油田开发过程中, 尤其是低渗透油田开发过

程中, 水力压裂措施是经常实施的, 一般都假设压裂后物理模型符合下列描述:

(1) 假设井在无限大油藏中心, 井贯穿于整个地层。

(2) 油藏为各向同性、单重孔隙结构或双重孔隙介质油藏。

(3) 垂直裂缝贯穿地层, 并对称于井轴。流体在裂缝中的流动为线性流动, 或存在压降或不存在压降, 即是分别对应于有限导流和无限导流的情况。

(4) 油藏中流体为单相弱可压缩牛顿流体, 常粘度、常压缩系数。

(5) 一般考虑油藏为水平地层, 重力作用可以忽略不计。

(6) 地层中流体的流动, 若裂缝导流能力较大或为无限导流能力时, 则为严格椭圆流动; 若裂缝导流能力较小即为有限导流能力时, 则地层中流体的流动为近似椭圆流动。

单井流量动态预测模型及解

当垂直裂缝井以定压力生产时, 地层中的压力扰动是从裂缝开始的, 逐步以椭圆等压面的形式向外扩展传播, 经过 t 时间, 等压面从 $\xi=0$ 传播到 $\xi=\xi_R$ 处。

刘曰武: 1988年毕业于大庆石油学院, 1996年在中国科学院渗流流体力学研究所获博士学位, 目前在中国科学院力学研究所工作, 一直从事油气藏工程、试井理论及渗流力学等方面的研究工作。

此时椭圆的传播长短轴分别为

$$a_R = x_f \cdot \text{ch} \xi_R \quad b_R = x_f \cdot \text{sh} \xi_R$$

椭圆的面积为

$$\Omega_R = \pi a_R b_R = \pi x_f^2 \cdot \text{ch} \xi_R \cdot \text{sh} \xi_R$$

其中 x_f ——垂直裂缝半长;

ξ_R ——与时间有关的影响椭圆坐标;

$\text{ch}(\cdot)$ $\text{sh}(\cdot)$ ——双曲余弦、正弦函数。

均质地层中的积分形式的质量守恒方程为^[7]

$$t_D = \frac{w}{2} \int_0^{\xi_R} \frac{P_D}{q_D} \text{ch} 2\xi \, d\xi = \frac{w}{8} [\text{ch}(2\xi_R) - 1] \quad (1)$$

双重介质地层中影响椭圆的传播方程为^[7]

$$t_D + \frac{(1-\omega)^2}{\lambda} (1 - e^{-\frac{\lambda t_D}{1-\omega}}) = f(t_D) = \frac{w}{8} [\text{ch}(2\xi_R) - 1] \quad (2)$$

其中

$$P_D = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} P_D(\xi, \eta) \, d\xi$$

无量纲压差

$$P_D = \frac{P_i - P}{P_i - P_w}$$

无量纲流量

$$q_D = \frac{\mu q}{2\pi K h (P_i - P_w)}$$

无量纲时间

$$t_D = \frac{K t}{\mu(\phi C_f) x_f^2}$$

双重介质地层的储能比 $\omega = \frac{\phi_f C_f}{\phi_m C_m + \phi_f C_f}$

双重介质地层的窜流系数 $\lambda = \frac{K_f}{K_m + K_f} \omega C_f^2$

无限导流垂直裂缝井的流量解为^[7]

$$q_D = \frac{1}{\xi_R} \quad (3)$$

对均质和双重介质地层 ξ_R 可分别由质量守恒方程(1)、(2)求得。

有限导流垂直裂缝井的流量解为^[7]

$$q_D = \frac{F}{\pi} \beta \tanh\left(\frac{\pi}{2} \beta\right) \quad (4)$$

其中 $\beta = \left(\frac{2}{F_{CD} \xi_R}\right)^{1/2}$

$\tanh(\cdot)$ ——双曲正切函数。

由(3)、(4)两式即可求得均匀介质、双重介质的有限导流和无限导流的定压生产条件下的流量动态解。

理论曲线

1. 无限导流垂直裂缝井的理论典型曲线

由方程式(1)、(3)可以求出双重介质油藏和均匀介质油藏的无限导流垂直裂缝井的理论典型曲线。影响双重介质油藏的无限导流垂直裂缝井的理论典型曲线的主要参数是 ω 和 λ , 其主要影响如下:

(1) 双重介质地层储能比 ω 的影响

当 λ 相同时, ω 对双重介质油藏的无限导流垂直裂缝井的理论典型曲线的影响如图 1 所示。从图中可以看出, ω 增大时, 流量变化增大。

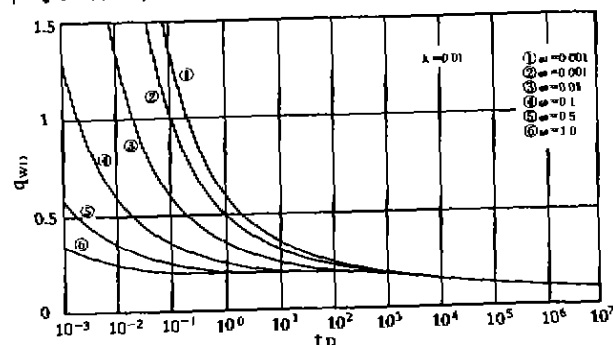


图 1 ω 对双重介质油藏中无限导流垂直裂缝井流量的影响

(2) 双重介质地层窜流系数 λ 的影响

当 ω 相同时, λ 对双重介质油藏的无限导流垂直裂缝井的理论典型曲线的影响如图 2 所示。从图中可以看出, λ 增大时, 流量变化增大。

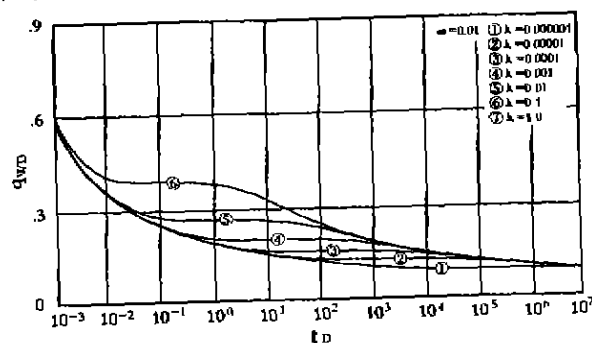


图 2 λ 对双重介质油藏中无限导流垂直裂缝井流量的影响

2. 有限导流垂直裂缝井的理论典型曲线

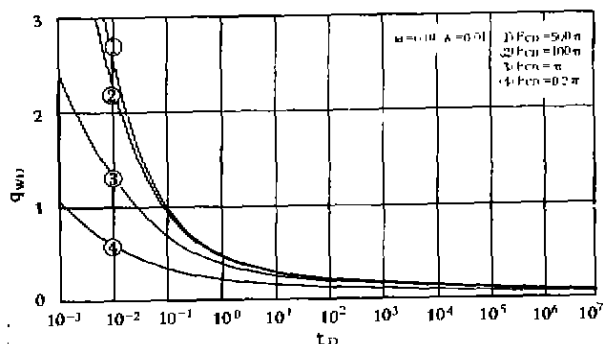
影响双重介质油藏的有限导流垂直裂缝井的理论典型曲线的主要参数是 F_{CD} 、 ω 和 λ , 其主要影响如下:

(1) 无量纲导流能力 F_{CD} 的影响

根据方程(4), 我们可以做出不同无量纲导流

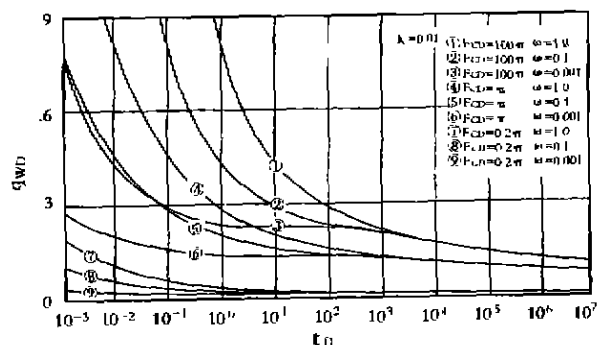
(1) 无量纲导流能力 F_{CD} 的影响

根据方程(4), 我们可以做出不同无量纲导流能力 F_{CD} 时的双重介质油藏的有限导流垂直裂缝井的理论典型曲线, 如图3所示。从图中可以看出: 对于相同的 ω 和 λ , 随 F_{CD} 的增大, 流量变化幅度增大。

图3 F_{CD} 对双重介质油藏中无限导流垂直裂缝井流量的影响(2) 双重介质地层储能比 ω 的影响

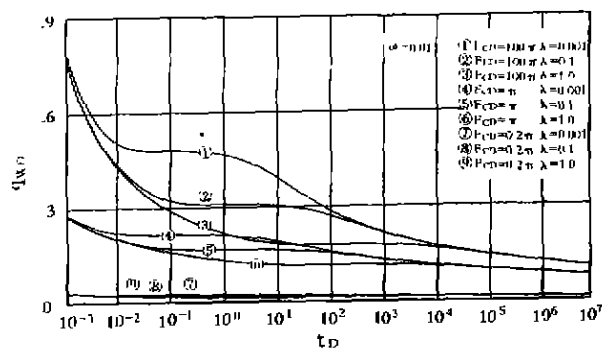
ω 对双重介质油藏的有限导流垂直裂缝井的理论典型曲线的影响和 ω 对双重介质油藏的无限导流垂直裂缝井的理论典型曲线的影响是近乎一致的。

当 F_{CD} 、 λ 相同时, ω 对双重介质油藏的有限导流垂直裂缝井的理论典型曲线的影响如图4所示。从图中可以看出, ω 增大时, 流量变化增大。

图4 ω 对双重介质油藏中有限导流垂直裂缝井流量的影响(3) 双重介质地层窜流系数 λ 的影响

λ 对双重介质油藏的有限导流垂直裂缝井的理论典型曲线的影响和 λ 对双重介质油藏的无限导流垂直裂缝井的理论典型曲线的影响也是近乎一致的。

当 F_{CD} 、 ω 相同时, λ 对双重介质油藏的有限导流垂直裂缝井的理论典型曲线的影响如图5所示。从图中可以看出, λ 增大时, 流量变化增大。

图5 λ 对双重介质油藏中有限导流垂直裂缝井流量的影响

解的对比

为了证明解的正确性, 我们将本文解的简化情况, 即简化为均质介质油藏中垂直裂缝井的流量解的情况与已有的解作了对比。

1. 无限导流垂直裂缝井的流量解的对比

本文中无限导流情况的解与文献[1, 2, 5]所给的解作了对比, 如图6所示。从对比情况来看, 本文解的简化情况更接近于 Kucuk 的精确解, 介于 A.C.Grigarten 的解和 F.Kucuk 的解的中间, 而 Li.Y.C 的无限元解与这两个已较为广泛应用的解在早期段有较大差异。

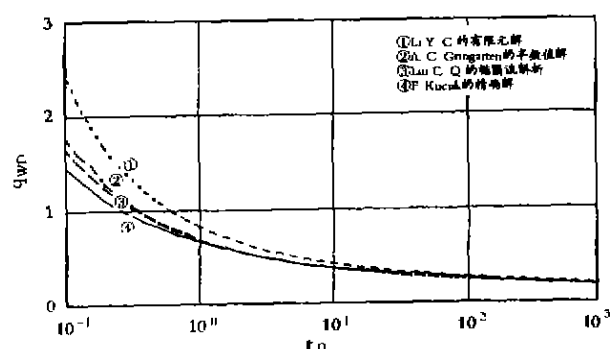


图6 本文流量解与已有无限导流垂直裂缝井流量解的对比

2. 有限导流垂直裂缝井的流量解的对比

本文的有限导流解的情况与文献[5]中所获得的均质油藏有限导流垂直裂缝井的流量解的情况作了对比, 对比情况如图7所示。

两者在后期段是近乎一致的, 在早期段存在一定差别, 而本文有限解在 $F_{CD} > 500$ 后和无限导流的流量解是一致的, 可以保证有限解的精确度。

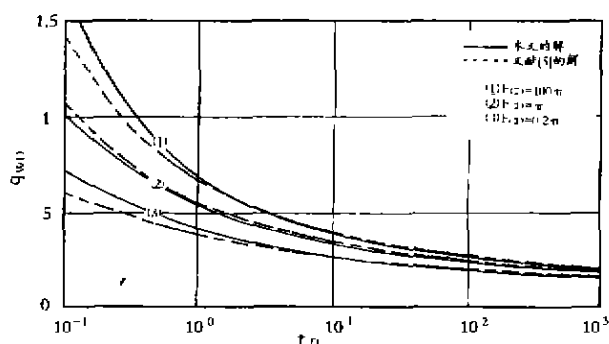


图7 本文流量解与已有有限导流垂直裂缝井流量解的对比

流量动态预测方法的应用

根据产量预测的目的和应用范围不同,将其分为两种:第一种是措施后产量预测;第二种是措施前产量预测。

第一种流量动态预测方法主要用于长时间开发油田的措施效果评价和措施后产量预测,其基本原理是在已知一段流量史和地层基本参数(如地层厚度、孔隙度、综合压缩系数、地层渗透率等)以及井的参数(如井径等)的情况下首先利用无量纲理论曲线和实际曲线的拟合,得到拟合参数 t_m 、 P_m 和无量纲导流能力 F_{cd} ,根据拟合参数求得裂缝半长 x_f 并将无量纲导流能力 F_{cd} 转化为有量纲裂缝导流能力 F 。最后根据所得的拟合曲线和拟合参数可对未来产量进行预测,并可对已知的流量史进行验证。

本文选用文献[4]所给的井例,说明流量动态分析方法的使用情况。其基本数据和流量动态数据如表1和表2:

表1 气藏基本数据

气藏数据名称	原文数据	法定单位数据
气藏压力 P_i	2394 psi	16.51 MPa
气藏温度 T	720°R	400K
气层厚度 h	32 ft	9.75 m
气层渗透率 K	0.0081 md	$8.0 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}^2$
气层孔隙度 ϕ	0.107	0.107
系统总的压缩系数 C_t	$2.34 \cdot 10^{-4} \text{ psi}^{-1}$	$3.394 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$
原始天然气粘度 μ	0.0176 cp	0.0176 mPa·s
真实气体拟压力差 $\Delta m(p)$	$396 \cdot 10^6 \text{ psi}^2/\text{cp}$	$18824.85 \text{ MPa}^2/\text{mPa} \cdot \text{s}$

表2 流量动态数据

时间(d)	原文流量 $q(\text{Mcf/d})$	法定单位流量 (Mm^3/d)
20	625	17.70
35	476	13.48
50	408	11.55
100	308	8.82
150	250	7.08
250	208	5.89
300	192	5.44

第一种流量动态分析的半对数拟合图如图8所示。

本文例子拟合可得裂缝半长

$$x_f = 207.16 \text{ m} \quad (\text{原文结果 } x_f = 725 \text{ ft})$$

导流能力

$$F = 0.0896 \mu\text{m}^2 \cdot \text{m} \quad (\text{原文结果 } F = 294 \text{ md} \cdot \text{ft}).$$

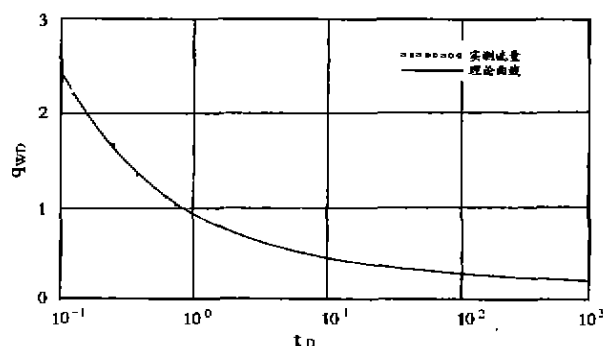


图8 实例分析的拟合曲线

第二种方法主要用于措施设计和措施时对措施效果的预测。其基本原理是根据压裂措施设计的裂缝半长、裂缝导流能力以及地层和井的参数,选择适当的流量解模型来预测措施效果。假设仍然利用上例所给的井的参数和地层参数对任一时间点的产量进行预测,预测结果与实际产量的对比表如表3所示。半对数产量预测曲线如图9所示。

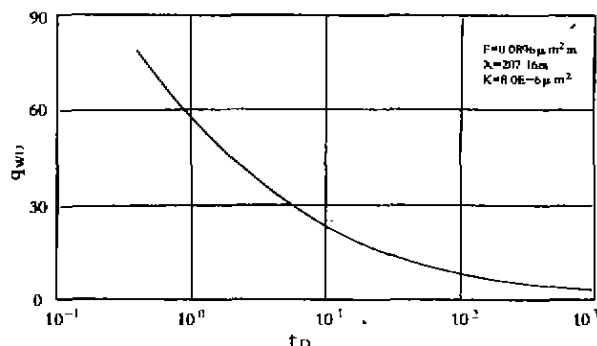


图9 压裂设计效果预测计算曲线

欢喜岭油田欢17块气顶气藏地质储量 与剩余可采储量研究

王俊魁* 李建民

关明弘

TE327
TE328

(大庆石油管理局勘探开发研究院, 大庆 163712) (大庆石油管理局第一采油厂, 大庆 163001)

摘要 对欢喜岭油田欢17块气顶气藏的地质储量和剩余可采储量进行了研究, 结果表明, 气藏的地质储量比上交的探明储量减少了27.9%, 在储量计算参数中变化较大的是含气面积, 重新圈定的含气面积比原来减少了33.1%。动态预测结果表明, 气藏中至少还有 $3.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右的剩余可采储量。这些储量主要集中在锦2-丙6-3井附近, 因此开发好锦2-丙6-3井是提高全气藏最终可采储量的关键, 预计全气藏最终采收率可达到60%以上。

关键词 气顶气藏 含气面积 气层+有效厚度 地质储量 动态 剩余储量

剩余油, 可采储量

然气地质储量为 $10.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

引言

欢17块大凌河油层气藏位于下辽河坳陷西部凹陷欢喜岭油田中部, 是一个具有边底水的气顶砂岩气藏。原确定的气顶含气面积为 1.3 km^2 , 天

气藏目前采出程度较低, 至1997年12月, 采出程度仅为32.3%。在气藏的采气井中, 目前仅剩一口井在正常生产, 其余气井均已停产关井。这样低的采出程度就已接近废弃, 原计算的地质储量是否落实? 气藏中还有多少剩余可采储量? 这是进行

表3 预测结果与实际产量的对比

时间(d)	20	35	50	150	250	300	365	730	1460	3650
实际值(Mm^3/d)	17.70	13.48	11.55	7.08	5.89	5.44	/	/	/	/
计算值(Mm^3/d)	17.21	13.45	11.50	7.18	5.85	5.44	5.07	3.99	3.23	2.56

结 论

1. 本文给出了双重介质油藏中垂直裂缝井的流量解及简化情况均质油藏的流量动态解。
2. 通过本文解的简化情况与已有解的分析对比证明了本文解的正确性。
3. 分析说明了双重介质油藏中的垂直裂缝井流量动态受三个因素的影响。
4. 通过一口井例的流量动态预测说明了该解的使用, 给出了两种流量动态的预测方法。

参考文献

1. Gringarten, A. C., Remey, H. Jr, and Raghavan, R; Unsteady-state pressure distribution created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture, SPEJ (August 1974)
2. F. Kucuk and W. E. Brigham; Transient flow in elliptic system SPEJ (dec. 1979)
3. H. Cinco - ley, V. F. Samaniego and N. Dominguez, ; Transient pressure analysis for a well with finite conductivity fracture SPEJ (August, 1978)
4. Agarwal, R. G. and Carter, R. D.; Type curves for evaluation and performance prediction of low-permeability gas wells stimulated by massive hydraulic fracturing SPE 6838
5. Y. C. Li and N. C. Huang; Flow field modeling near a well with a conductive fracture Int. J. Numer. Meth. in Fluids, Vol. 15(1992)
6. 刘慈群、杨介; 在双重介质中有限导流垂直裂缝井的试井分析方法, 试采技术 1990(3)
7. 刘慈群; 有限导流垂直裂缝井的流量动态, 油气井测试, 1992(2)

* 王俊魁: 1941年生, 高级工程师, 1965年毕业于东北石油学院采油工程专业, 长期从事油藏工程研究与油气藏开发设计工作, 著有《油气藏工程方法研究与应用》以及《油气藏动态研究与预测》等书。